

VIS/NIR 투과스펙트럼을 이용한 사과경도 예측

Measurement of Apple Firmness by VIS/NIR Transmittance

조현성* 노상하* 황인근** 이희영*
정회원 정회원 정회원 정회원
H. S. Cho S. H. Noh I. G. Hwang H. Y. Lee

1. 서론

청과물의 생산이 증가하고 소득과 식생활 문화가 향상되면서 소비문화도 점차 고급화, 다양화 되어 생산단계에서 보증된 품질을 유통과정중에 유지하는 일이 중요해졌으나, 생산, 유통량의 증가는 인력작업에 한계를 가져오고 있다. 인력작업에서 발생하는 비규격 출하와 선별불량 등의 문제는 도매시장에서의 재선별 등 추가적인 유통비용을 초래하며, 기계화 역시 과실의 손상을 가져올 수 있다는 단점 때문에 크게 확대되지 못하고 있다. 또한 저온저장시설의 보급으로 장기저장이 일반화 되면서 과실의 품질변화에 대한 대처가 필요하며, 이에 생산과 선별단계에서 과실의 품질을 비파괴적으로 측정할 수 있는 기술의 개발이 요구되어 이미 비파괴 당도측정 등에 관한 많은 연구들이 수행된 바 있다. 과실의 경도는 일차적으로 기계적 특성으로 이해되어 가공기계와 포장재의 설계시 중요한 인자로 사용되며, 저장 및 유통중에 발생하는 품질변화와도 관계가 있는 것으로 보고되고 있다. 경도의 표준측정방법은 개체의 기계적인 파괴를 통해 강도를 측정하는 것이며, 이를 비파괴적으로 수행하기 위한 다각적인 연구가 시도되고 있다. 그 중 산업화의 가능성이 있는 비파괴기술로 근적외선 분광법이 연구되고 있는데, 국내외에서 과실의 당도판정에 근적외선 분광법을 이용한 사례가 많으며, 최근 반사스펙트럼의 한계를 극복하고자 투과광을 이용한 당도예측 시스템이 외국에서 개발된 바 있다. 근적외선 분광법을 통해 과실의

경도예측이 가능해지면 단일한 분광시스템을 통해 과실의 내부품질에 대한 종합적인 판정이 가능해질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 사과의 투과스펙트럼을 획득하여 그 투과특성을 구명하고, 500~1100nm 범위의 투과광을 이용하여 경도를 예측할 수 있는 지 그 가능성을 알아보고자 하며, 과피에 의한 영향을 제거하기 위하여 과육부분의 투과스펙트럼을 중점적으로 분석하고자 한다.

본 연구의 구체적인 목적은 다음과 같다.

1. 과육 시편의 기초 물성을 구명하기 위해 시편의 방향 및 재하속도에 따른 압축특성을 조사하고,
2. 투과광을 측정하기 위한 실험장치를 제작하고 500~1150nm 대역에서의 투과스펙트럼을 이용한 통계적 모델 및 신경회로망 모델을 개발하여 비파괴 경도 측정의 가능성을 구명한다.

2. 재료 및 방법

가. 공시재료

본 연구에서 사용된 과실은 1999년 11월에 경북 김천소재의 과수원에서 수확된 후지사과 129개이다. 시료의 각 개체당 4부위에서 코르크 보어러와 칼날를 이용하여 $\phi 13\text{mm} \times 15\text{mm}$ 의 시편을 514개 채취하였으며(그림 1), 각 시편에 대해서 투과스펙트럼을 측정하고 물성 분석기를 통해 힘-변형 데이터를 획득하였다.

* 서울대학교 생물자원공학부

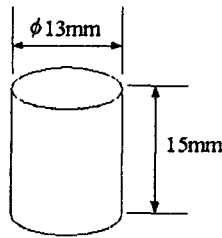


Fig. 1 Sample slice.

나. 실험장치

투과스펙트럼 측정에 사용된 분광광도계는 S2000-FL(Ocean Optics, USA)로 미량의 광측정이 가능하고 CCD소자배열을 통해 신호를 받아들여 응답속도가 빠르므로 과실의 투과스펙트럼을 실시간으로 획득할 수 있다. 시편에 대한 투과스펙트럼은 1개의 집중형 텅스텐-할로겐 램프(LS-1, Ocean Optics, USA)를 통해 획득하였으며, 광원과 시편 및 프로브가 일직선상에 놓이도록 배치할 수 있는 간이 측정장치를 구성하였다(그림 2). 분광광도계의 소자가 매우 민감하기 때문에 외부광원을 차단하기 위한 차단막을 사용하였다.

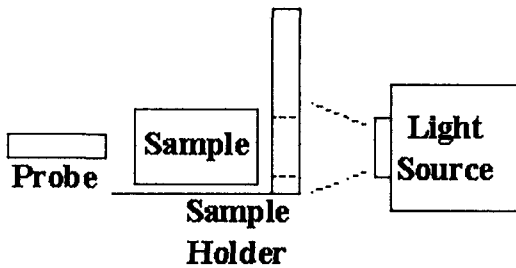


Fig. 2 Schematic of sample holder for lining up probe, sample and light source.

실험에 사용된 경도 측정장치는 물성분석기(TA-HDi, Stable Micro Systems, England)를 사용하였다. 이 장치는 폭넓은 범위의 하중을 측정할 수 있고, 다양한 종류의 압축 및 인장도구를 제공하며, 하중재하속도와 침투깊이 등을 자유롭게 조절할 수 있다. 특히 윈도우즈95 호환 환경에서도 제어할 수 있도록 사용자환경이 제공된다.

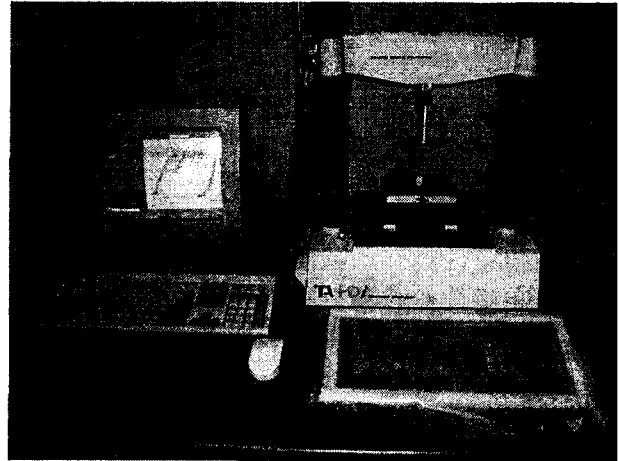


Fig. 3 Texture analyzer (TA-HDi).

하중재하속도는 예비실험을 통해서 시편을 정상적으로 파괴시킬 수 있는 속도로 정했는데, 하중재하속도가 너무 빠르면 압축면이 비스듬하게 어긋나면서 파괴점이 뚜렷하게 나타나지 않고, 하중재하속도가 너무 느리면 데이터량이 늘어나고 압축시간이 길어진다. 이에 10mm/min를 적정속도로 하였으며, 이것은 ASAE S368.3 MAR95에서 권장하는 2.54mm/min과 국내의 연구결과에서 제시된 25mm/min 사이의 속도이다. 압축거리는 파괴가 충분히 일어날 수 있도록 5mm로 결정하였다. 압축재료의 압축면과 바닥면이 모두 편평한 형태의 시편이므로 압축도구는 평판형을 사용하였다.

다. 과실의 경도분석

과실류에서의 경도란 그 기계적 특성을 표현하기 위한 추상적인 개념으로 여러 지수들을 통해 구체화되며, 대표적으로 Secant Modulus, Tangent Modulus 및 Rupture Force가 많이 사용된다(그림 4). 본 연구에서는 파괴점의 1/2지점을 선택하여 원점과 연결한 직선의 기울기를 Secant Modulus라 하고, 여기에서 원점방향으로 미소구간에 위치한 점과의 기울기를 Tangent Modulus로 사용하였는데, 그 이유는 이 구간에서 힘-변형곡선의 직선성이 비교적 안정되게 유지되기 때문이다.

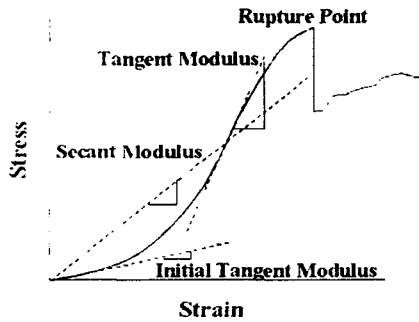


Fig. 4 Definition of the moduli in non-linear Stress-Strain diagrams.

라. 경도예측모델

부분최소제곱회귀모델은 각 독립변수를 직교성에 의거하여 새로운 주성분조합으로 재구성하여 다중공선성이 제거된 변수로 회귀모델을 개발한 것이다. 부분최소제곱회귀에서는 농도정보에 따라 가중치가 주어진 스펙트럼을 통해 인자가 추출되고, 이를 이용하여 회귀모델이 만들어진다. 본 연구에서 분석도구로 사용한 MATLAB에서는 NIPALS(Nonlinear Iterative Partial Least Squares) 알고리즘을 사용하여 성분과 관련된 인자를 분리해 낼 수 있다. 분리된 인자들로 예측모델을 개발하기 위해 Cross-Validation기법을 이용하여 예측오차제곱합(Prediction Residual Error Sum of Squares)을 계산하고 그 값이 최소가 되게 하는 인자수를 최적인자수로 하여 예측모델의 독립변수로 사용하였다. 또 스펙트럼의 흡수대역이 복잡하게 중첩되어 분석이 어렵거나 직접적으로

흡광도와 관련되지 않는 무기물 등을 측정할 때 자주 이용되는 신경회로망모델의 개발 가능성을 알아보았다. 본 연구에서는 오류역전파 알고리즘을 이용하여 학습을 수행하였으며, 탐색을 통해 가장 좋은 성능을 보이는 은닉층의 개수를 결정하고자 하였다. 학습에 사용된 전달함수는 시그모이드 함수이며, 학습률은 0.1, 모멘텀은 0.9로 하였다.

스펙트럼 데이터의 전처리를 비롯하여 회귀모델의 개발과 검증 및 신경회로망의 학습등은 MATLAB(Ver. 5.31, MathWorks Inc.)을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 압축방향에 따른 압축특성의 변화

정육면체 시편을 채취하여 과심방향(Radial)과 접선방향(Tangential)에 대해 재하속도를 달리하며 압축을 가하였다. 동일 시편에 대해 두 방향 모두 압축할 수 없기 때문에, 두 개의 개체에서 채취하여 무작위로 추출한 시편에 대해 측정함으로써 시편강도의 불균일을 해소하고자 하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 후자의 경우는 재하속도에 관계없이 압축방향에 따라 Secant Modulus가 비슷한 수치를 나타내었으나 Tangent Modulus는 압축방향에 따라 큰 차이를 보였다. 조나골드에서는 두 지수 모두 큰 차이를 보였으며, 재하속도가 낮을수록 차이가 크다. 직선구간에서의 Tangent Modulus는 두 품종 모두 과심방향으로 압축할 때 큰

Table 1 Difference of firmness between radial and tangential compression for apple flesh

Loading Rate	Compression Direction	Fuji			Jona Gold		
		Secant Modulus (MPa)	Tangent Modulus (MPa)	Rupture Force (N)	Secant Modulus (MPa)	Tangent Modulus (MPa)	Rupture Force (N)
0.1mm/s	Radial	2.89	4.45	109.76	4.48	6.35	105.38
	Tangential	2.93	2.69	114.60	2.49	2.44	84.12
0.4mm/s	Radial	3.83	4.65	161.33	4.39	5.63	98.53
	Tangential	2.52	2.78	110.12	2.59	2.71	91.89
0.7mm/s	Radial	3.49	5.19	129.85	4.17	5.48	105.12
	Tangential	3.14	3.31	125.89	2.61	3.07	124.79

값을 가진다. 또 과심방향으로의 압축에서는 Initial Tangent Modulus와 Tangent Modulus의 차이가 크고, 힘-변형 관계가 비교적 곡선에 가깝게 나타난다. 이는 과피와 과심에서의 경도가 차이가 나기 때문에 양쪽 압축면이 서로 다른 경도를 가지게 되어 발생하는 현상으로 판단된다. 특히, 후자의 경우는 과피부근의 과육이 연하기 때문에 초기압축강도가 낮고, 조나골드는 비교적 모든 부위에서 고른 강도를 가지는 것으로 이해할 수 있다. Rupture Force의 경우는 두 품종 모두 일정한 경향을 보이지 않았다.

나. 투과방향에 따른 과육 투과스펙트럼의 변화

과육을 정육면체로 절단하여 각 방향에 따라 투과도의 차이를 살펴보았다. 과육은 과심에서 과피방향으로 투과할 때 가장 투과율이 좋으며, 이에 접선방향으로 투과할 때는 투과율이 현저하게 떨어졌다(그림 5). 이는 씨방을 중심으로 과육의 섬유질이 배열하기 때문인 것으로 보이는데, 과육의 투과방향이 섬유질 배열방향과 조금만 어긋나도 투과율 차이가 크게 발생하므로 분광분석법을 응용하는데 있어 투과율의 차이에 의한 산란을 보정하기 위한 알고리즘이 요구된다.

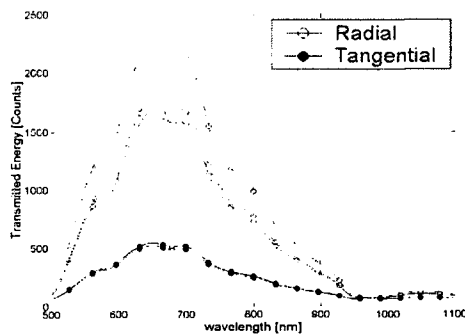


Fig. 5 Transmission energy spectra of the cylindrical slice of apple flesh in radial and tangential transmission directions.

다. 경도지수의 검출 및 경도지수간의 상관관계

514개의 데이터 중 압축상태가 양호하고 과피

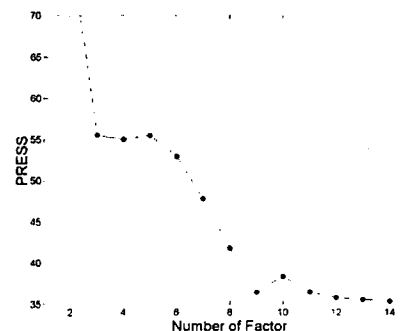
점이 뚜렷하게 분별가능한 110개에 대해서 Secant Modulus, Tangent Modulus 및 Rupture Force를 구하였다. 각 인자간의 상관관계는 비교적 낮은 편이었으며, 특히 Rupture Force는 Secant Modulus 및 Tangent Modulus와의 상관성이 매우 낮은 것으로 나타나, 특정 경도지수를 통해 과실의 압축특성을 대표하기는 어려울 것으로 판단된다.

Table 2 Correlation among the Firmness Indices of Fuji Apple

	Secant Modulus	Tangent Modulus	Rupture Force
Secant Modulus	1.000	0.845	0.142
Tangent Modulus	0.845	1.000	0.089
Rupture Force	0.142	0.089	1.000

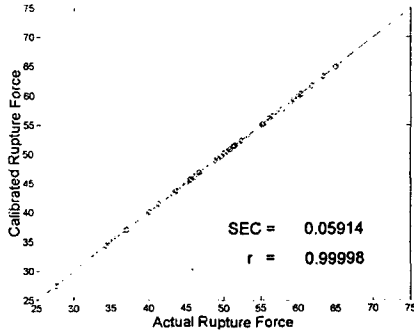
라. PLSR 경도예측모델

획득한 투과스펙트럼에 평활화, 미분 등의 여러 가지 전처리와 산란보정, 정규화 등의 보정알고리즘을 수행한 후 경도예측모델을 개발하였다. 그러나 전처리와 보정을 가하지 않은 흡광도 데이터를 이용한 모델과 예측성능에 있어 유의한 차이가 나타나지 않았다. 따라서 스펙트럼에 의한 경도예측에 미치는 성분의 농도변화나 투과율의 변화 등의 영향은 절대적이지 못한 것으로 판단된다. Rupture Force의 경우는 모델상관계수가 0.80 이상인 모델이 다수 발견되었으며, 흡광도스

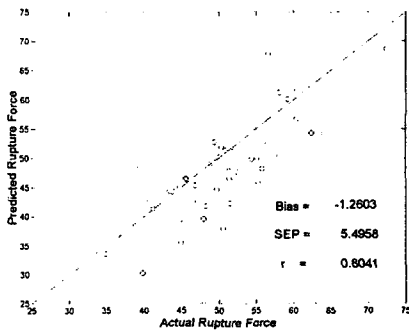


(a) PRESS

펙트럼을 흡광도합으로 나누어 정규화 한 값을 이용할 때 상관계수 0.82, 예측표준오차 4.99N을 나타내었다. 그러나 Tangent Modulus나 Secant Modulus는 모델상관계수가 매우 낮아 예측이 불가능한 것으로 보인다.



(b) Calibration

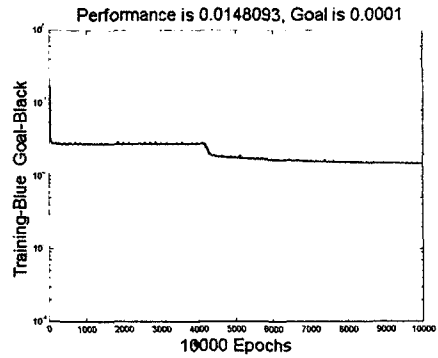


(c) Validation

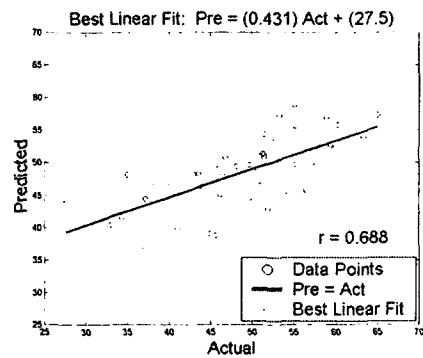
Fig. 6 Plots of PRESS, calibration and validation results in predicting rupture force by PLSR model with the absorbance spectra.

마. 신경회로망 경도예측모델

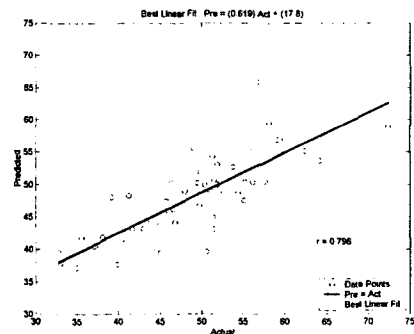
2018개의 데이터 중 10개마다 추출한 201개의 데이터를 입력데이터로 사용하였다. PLSR모델보다 다소 성능이 떨어졌으나 큰 차이를 보이지는 않았다. 은닉층의 구조와 학습횟수에 따라 매우 불안정한 결과를 보여주었으며, 3개의 은닉층으로 10,000번의 학습을 거쳤을 때 Rupture Force는 PLSR모델과 유사한 정도로 예측되었다.



(a) Training



(b) Calibration



(c) Validation

Fig. 7 Plots of training, calibration and validation results in predicting rupture force by NN model with the absorbance spectra.

투과스펙트럼을 이용한 경도의 예측은 기존의 반사스펙트럼에 비해서 크게 향상된 결과를 보여주지 못했는데, 이것은 경도가 과실표피부근의 과육상태에 더 큰 영향을 받기 때문인 것으로 판단

된다. 나아가 경도에 영향을 미치는 펙틴물질의 기본 결합구조가 당이나 수분 등 다른 성분의 결합구조와 유사하고 그 절대량은 매우 적으므로, 오히려 다른 성분에 의해 신호가 크게 영향을 받기 때문에 분광학적인 접근이 용이하지 않은 것으로 생각된다. 따라서 전체 파장영역에서의 모델 개발 보다는 경도와 관련된 물질의 흡수피크에 대한 연구를 통해 가용대역을 고찰하고 적합한 영역의 스펙트럼정보를 집중적으로 분석한다면 보다 나은 결과를 기대할 수 있으리라 생각한다. 또, Secant Modulus와 Tangent Modulus는 조직내의 단일세포차원에서 발생하는 미시규모적 변형과 관련되며, Rupture Force는 세포구조차원의 거시적인 규모에서 발생하는 파괴와 관련되어, 각각의 지수에 대해 적용할 수 있는 조직변화의 기작이 다르며 이에 영향을 미치는 물리적, 화학적 특성도 다르다. 따라서 경도에 대한 종합적 고려를 통해 과실의 경도를 표현할 수 있는 대표지수에 대한 정의가 우선적으로 이루어져야 한다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 사과와 투과스펙트럼을 이용하여 경도를 비파괴적으로 측정하기 위한 예측모델을 개발하기 위한 기초연구로 수행되었다. 구체적인 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 과육시편에 대한 압축 및 투과방향에 따라 압축강도와 투과특성이 다르게 나타났으며, 압축 및 투과 방향이 섬유질의 방향과 일치할 때 비교적 높은 경도지수와 투과율을 보여주었다.
2. Rupture Force는 Secant Modulus나 Tangent Modulus와 낮은 상관성을 보여주어 각각의 경도 지수가 의미하는 물리적 특성이 다른 것을 알 수 있었다.
3. PLSR모델은 500~1150nm 대역의 2018개 스펙트럼 데이터를 이용하여 개발되었다. Rupture Force의 경우는 흡광도 스펙트럼을 흡광도함으로 나누어 정규화한 값을 이용할 때, 상관계

수 0.82, 예측표준오차 4.99N를 나타내었고, Secant Modulus와 Tangent Modulus의 경우는 예측모델이 부적합한 것으로 나타났다.

4. NN 모델의 경우에 은닉층의 개수와 학습횟수에 따라 모델의 예측성능이 불안정한 결과를 보여주었으며, 3개의 은닉층에서 10,000번의 학습을 통해 Rupture Force모델은 상관계수 0.80의 예측성능을 보였다.
5. 500~1100nm 파장 대역의 투과스펙트럼을 사용하여 경도를 예측한 결과 Rupture Force에 대해서는 어느 정도 정확한 측정이 가능하였으나 Secant Modulus와 Tangent Modulus에 대해서는 낮은 측정 정확도를 보여주었다. 앞으로 사과 경도에 대한 명확한 정의와 함께 관련된 성분의 흡광특성에 대한 연구가 지속적으로 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. 김만수, 박종민, 최동수. 1992. 과실의 힘-변형 특성. 한국농업기계학회지 17(2):156-170.
2. 이강진, 최규홍, 박보순, 조영길. 1998. 근적외선을 이용한 사과의 경도측정. 한국농업기계학회 1998년 동계학술대회 논문집 357-361.
3. 최창현, 이강진, 박보순. 1997. 가시광선/근적외선 분광분석법을 이용한 사과의 당도 및 경도 측정. 한국농업기계학회지 22(2): 256-265.
4. ASAE. 1996. ASAE Standards. S368.3 MAR95.
5. Lammertyn, J., B. Nicolai, K. Ooms, V. De Smedt and J. De Baerdemaeker. 1998. Non-destructive measurement of acidity, soluble solids, and firmness of Jonagold apples using NIR-spectroscopy. Trans. of the ASAE 41(4):1089-1094.
6. Mohsenin, N. N. 1986. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach, Science Publishers. New York, NY.